

УДК 551.465:551.466

СПЕКТРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И КИНЕМАТИКА КОРОТКОПЕРИОДНЫХ ВНУТРЕННИХ ВОЛН НА ГАВАЙСКОМ ШЕЛЬФЕ

© 2009 г. В. Г. Бондур*, Ю. В. Гребенюк*, К. Д. Сабинин**

*Научный центр аэрокосмического мониторинга “Аэрокосмос” Минобрнауки и РАН

105064 Москва, Гороховский пер., 4

E-mail: vgbondur@aerocosmos.info

**Институт космических исследований РАН

117997 Москва, ул. Профсоюзная, 84/32

E-mail: ksabinin@yandex.ru

Поступила в редакцию 11.11.2008 г., после доработки 16.03.2009 г.

По результатам анализа характеристик течений и температуры, измеренных в акватории б. Мамала (о. Оаху, Гавайи), исследованы основные свойства поля короткопериодных внутренних волн, которое отличается большой сложностью. Основное внимание уделено анализу спектральных характеристик и параметров орбит для волн с периодом 20 мин. По результатам исследований установлено, что в исследуемом районе наблюдаются два типа короткопериодных внутренних волн: достаточно интенсивные и быстрые волны, распространяющиеся преимущественно в океан, и более слабые и медленные волны, которые распространялись в основном к берегу. Высказано предположение о механизмах образования этих волн: быстрые и интенсивные волны, скорее всего, связаны с распадом локально генерируемых внутренних приливов, происходящим у края шельфов; медленные и слабые и очень короткие волны возбуждаются, по-видимому, в результате специфического взаимодействия пикноклина и сильных приливных течений над крутым склоном.

1. ВВЕДЕНИЕ

Анализ радиолокационных и оптических космических изображений поверхности океана у Гавайских островов показывает, что без специальной спектральной обработки [1–3, 13] короткопериодные внутренние волны (КПВВ) в этом районе не выявляются, как это бывает у края материковых шельфов [1, 4, 12, 13, 17, 18]. Это может быть связано не только с относительно большой толщиной верхнего перемешанного слоя, но и с некоторыми особенностями генерации, распространения и формы КПВВ у островов. Располагая достаточно подробными данными измерений колебаний течений, температуры и звукорассеивающих слоев у бровки шельфа в заливе Мамала (о. Оаху, Гавайские острова), мы попытались охарактеризовать основные черты поля короткопериодных внутренних волн, принимая за такие волны с периодами менее одного часа.

2. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ ФОНОВЫХ УСЛОВИЙ И АНАЛИЗИРУЕМЫХ ДАННЫХ

Для исследования характеристик внутренних волн на шельфе у о. Оаху в акватории бухты Мамала использовались результаты гидрофизических измерений, выполненных в 2004 г. в рамках международного проекта [1, 2, 6, 13, 14, 19]. Измерения гидрофизических характеристик проводились с по-

мощью ряда стационарных станций, оборудованных термогирляндами и акустическими измерителями течений (ADP), а также с борта судов зондами STD и ХВТ и микроструктурных зондов (MSS). На рис. 1 показано расположение установленных на краю шельфа стационарных станций, на которых в течение 2–3 недель проводились измерения вертикальных профилей температуры (станции AT, BT, CT, DT) и трех составляющих векторов полей течений (станции AV, BV, CV). Термисторные цепочки и ADP располагались рядом.

Измерения температуры и течений проводились в трех областях бухты Мамала (см. рис. 1):

– на станциях AT и DT, установленных рядом с диффузором сбросового устройства;

– на станциях BT и BV, установленных в 3.5 км к востоку от диффузора;

– на станциях CT и CV, установленных в ~7 км к юго-востоку от диффузора.

На стационарных станциях течения измерялись в диапазоне глубин от 4 до 76 м с дискретностью по глубине 2 м и дискретностью по времени 1 минута. Измерения температуры воды в 2004 г. проводились на разных горизонтах от 17–33 м до 70–172 м с дискретностью по глубине 5–10 м и по времени 30 секунд [6, 13, 14, 19]. Накопленные данные с учетом дискретности и длительности измерений позво-

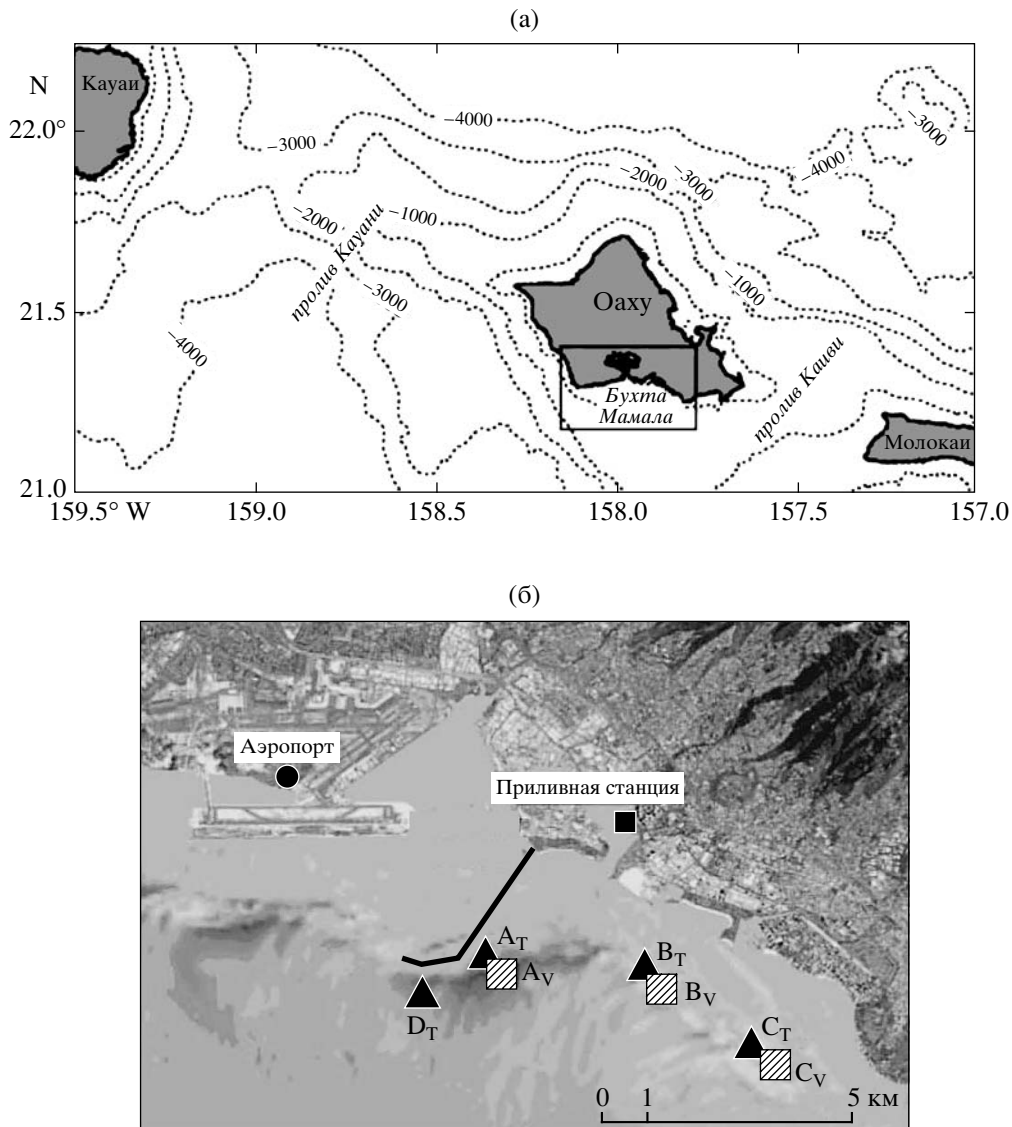


Рис. 1. Географическая и батиметрическая карта акватории в районе о. Оаху (а), расположение в бухте Мамала стационарных станций измерения температуры и скоростей течений (б).

ляют исследовать изменчивость гидрофизических характеристик в бухте Мамала в масштабах от нескольких минут до 20 суток.

Анализ данных гидрофизических измерений в бухте Мамала показывает, что в записях течений, температуры и звукорассеивающих слоев на фоне мощных многочасовых (главным образом, полу- и четвертьсуточных) колебаний эпизодически проявляются цуги и уединенные короткопериодные внутренние волны более или менее значительной амплитуды [4–6]. В отличие от волн, наблюдавшихся в других районах [1, 12, 23], они не являются квазисинусоидальными, появляясь в виде уединенных волн и цугов с небольшим числом колебаний. Кроме этого, эти внутренние волны сильно уступают по ам-

плитуде низкочастотным волнам, как это хорошо видно на рис. 2. На этом рисунке приведены колебания изотерм в диапазоне 23.5–28°C под действием внутренних волн, зарегистрированные на станции АТ 3 сентября 2004 г.

Из рис. 2 видно, что колебания изотерм имеют сложный характер – кроме доминирующих полусуточных волн, наблюдаются почти столь же мощные 6-часовые волны, а солитоноподобные колебания появляются как в виде солитонов углублений, так и в виде солитонов поднятий. Следует отметить, что солитоны наблюдаются не только в подошвах низкочастотных волн, как это обычно бывает [12], но и вблизи их гребней. Так, например, на рис. 2 видно, что в период 6–9 часов на гребне четвертьсуточ-

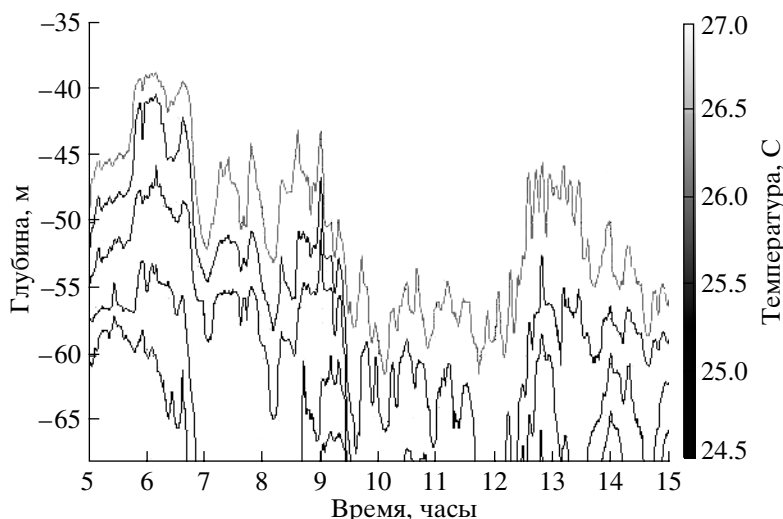


Рис. 2. Колебания изотерм под действием внутренних волн, зарегистрированные на станции АТ 3 сентября 2004 г.

ной волны прошел цуг из нескольких солитонов углубления, тогда как на заднем склоне следующей волны между 13–15 часами наблюдался цуг солитонов возвышения.

Такой необычный характер солитонов в районе, как и относительно слабое проявление их цугов, связано с тем, что ось пикноклина находится вблизи середины водной толщи. При эти условиях генерация солитонов затруднена, а при значительных колебаниях глубины пикноклина возможно образование солитонов обеих полярностей – при высоком термоклизе должны преобладать солитоны углублений, при низком – солитоны поднятий. На рис. 3 иллюстрируются сильные колебания глубины пикноклина в районе о. Оаху.

Учитывая сложный характер КПВВ в исследуемом районе, мы сосредоточили свое основное внимание на средних характеристиках поля этих волн, анализируя спектры колебаний изотерм и течений.

3. АНАЛИЗ ДАННЫХ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ В БУХТЕ МАМАЛА

Для исследования параметров короткопериодных внутренних волн в бухте Мамала на основе данных контактных измерений проводились вычисления и анализ: спектральных характеристик флуктуаций скоростей течений и колебаний изотерм; параметров орбит горизонтальных течений; изменчивости амплитуд КПВВ и когерентности этой изменчивости с внутренними приливами; фазовых скоростей и дивергенции орбитальных течений КПВВ. Рассмотрим основные результаты проведенных исследований.

На рис. 4 приведены спектры вертикальных скоростей смещений термоклина, оцененные по

колебаниям глубины залегания центральной изотермы термоклина (27°C) на станциях ВТ и СТ в 2004 г. Спектры вычислены для диапазона частот 0.02–60 ц/ч и представлены в полулогарифмическом масштабе. Флуктуации вертикальных скоростей в области частот больше 20 ц/ч были сглажены фильтром Баттеруорда 4-го порядка. Из рис. 4 видно, что на спектрах, помимо узких полусуточных и 5–6-часовых пиков, выделяется более широкий пик на частотах 3–5 ц/ч.

В то же время на частотных спектрах течений, представленных на рис. 5, короткопериодные ВВ не выделяются. Это можно объяснить общей тенденцией снижения роли горизонтальных движений с ростом частоты в случайном поле внутренних волн [15].

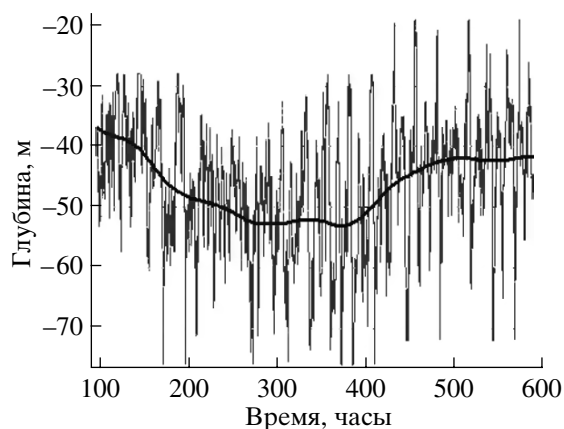


Рис. 3. Колебания глубина изотермы 27°C (центральной изотермы пикноклина) и ее сглаженное значение по измерениям на станции ВТ.

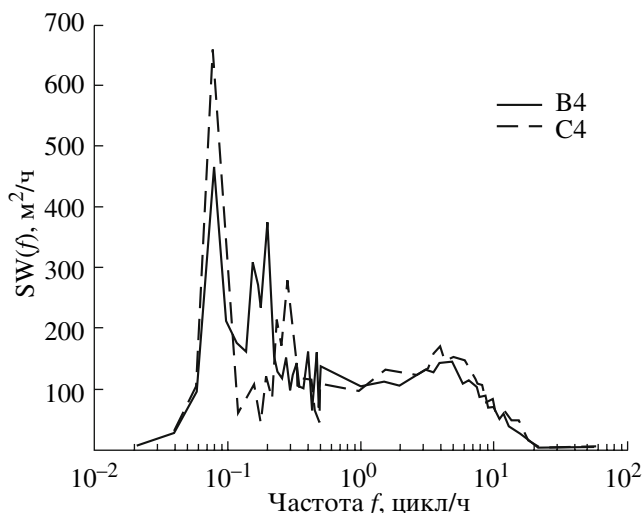


Рис. 4. Спектры вертикальных скоростей смещений глубины залегания термоклина $Sw(f)$, оцененные по колебаниям изотермы 27°C на станциях ВТ и СТ в 2004 г.

3.1. Анализ характеристик течений

Анализ данных измерений характеристик полей течений, выполненных с помощью акустического профилографа ADP показал наличие большого уровня шумовых помех. Для уменьшения ошибок измерений применялось усреднение исходных данных по глубине и времени. Исследования показали,

что особенно эффективным является сглаживание по глубине. Оптимальным является сглаживание по глубине фильтром Баттеруорда 4-го порядка с частотой среза 100 ц/км , при котором отношение сигнал/шум превышает 1 на частотах ниже 4 ц/ч . На более высоких частотах шум превалирует, что ограничивает частотную полосу при изучении КПВВ по данным ADP.

При обработке данных ADP учитывалось также ослабление сигнала и расхождение лучей при увеличении расстояния от измерителя. Вблизи границ слоя, охваченного измерениями, сказываются концевые эффекты фильтра сглаживания данных по глубине. С учетом всего этого при обработке мы ограничились анализом данных скоростей течений в слое от 10 до 70 м.

Особое внимание было уделено ошибкам в измерении вертикальных скоростей W , которые возникли из-за ошибок определения наклона лучей ADP. Вследствие этого результаты измерений W могли искажаться за счет “просачивания” горизонтальных компонент течения даже при точности измерения наклона лучей в 1° . Подобное “загрязнение” особенно существенно на низких частотах, где вертикальные скорости малы по сравнению с горизонтальными.

На рис. 5 представлены спектры горизонтальных течений и средние параметры орбит короткопериодных внутренних волн, рассчитанные по методу спектральных инвариант течений [9].

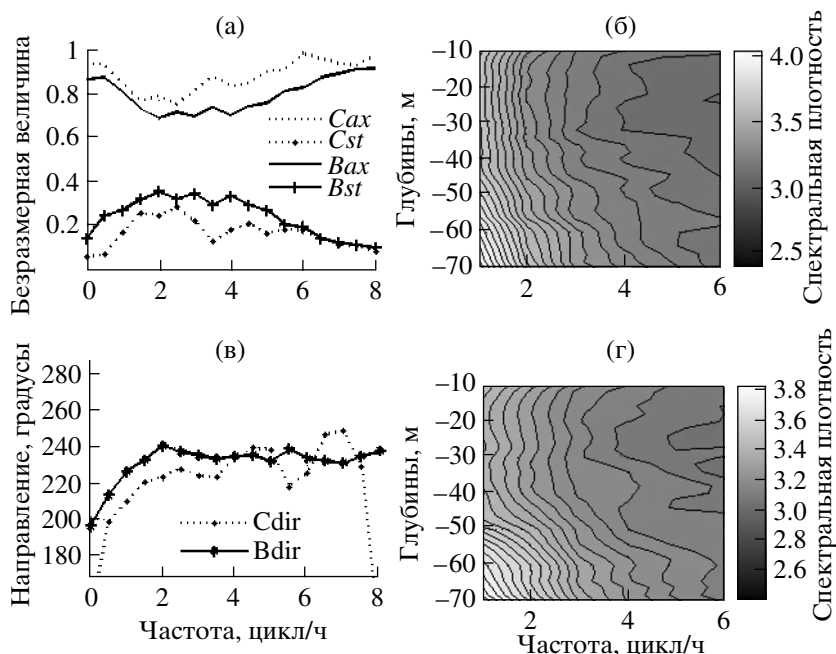


Рис. 5. Параметры орбит горизонтальных течений, рассчитанные по данным измерений на глубине 70 м на станциях В и С (а, в): отношение малой и большой осей орбит – (ax), степень их стабильности – (st), направление большой оси орбиты – (dir); спектры меридиональных течений в координатах частота–глубина на станциях С (б) и В (г), спектральная плотность приведена в логарифмическом масштабе.

Следует отметить, что на графиках, представленных на рис. 5, направление осей орбит дано в математической системе отсчета градусов – от направления на восток против часовой стрелки.

Из анализа рис. 5 видно, что спектры горизонтальных течений спадают по частоте равномерно, без пиков, но их средние орбиты в диапазоне частот 2–4 ц/ч относительно стабильны и узки. Орбиты вытянуты в юго-западном направлении, т.е. поперек изобат, которые отклоняются от параллели на 37° у станции В и на 52° у станции С.

Как известно [7, 8], в случае однонаправленных внутренних волн их орбитальные течения являются возвратно-поступательными. Измеренные параметры орбит горизонтальных течений, а именно, ненулевое отношение осей орбит, отличие их стабильности от единицы, указывают на достаточно сложную пространственно-временную структуру поля КПВВ в исследуемом районе. Тем не менее наблюдаемая некоторая вытянутость и стабильность средних орбит вблизи частоты 3 ц/ч, а также выраженность соответствующих КПВВ на спектрах вертикальных колебаний термоклина (см. рис. 2), позволяют выделить 20-минутные волны из общего фона довольно хаотических колебаний. В дальнейшем мы сосредоточим свое внимание именно на этих волнах.

Изменчивость параметров 20-минутных волн (интенсивности, степени направленности и направления волн) в обеих точках была очень значительной с явно выраженным преобладанием полусуточного периода. Для изучения колебаний интенсивности 20-минутных волн мы использовали скользящие значения среднеквадратических амплитуд в полосе частот вокруг 3 ц/ч, рассчитанные в перекрывающихся на 1 час двухчасовых отрезках. Для оценивания связи этой интенсивности с низкочастотными колебаниями термоклина была рассчитана соответствующая когерентность на примере колебаний глубины изотермы 27° (центральная изотерма термоклина) в точке В4 (см. рис. 6б).

Из рис. 6 видно, что наибольший уровень когерентности был на полусуточном периоде. При этом разность фаз между колебаниями термоклина и интенсивности 20-минутных волн была 141° , т.е. самые интенсивные КПВВ были не на гребне, а вблизи подошвы внутреннего прилива (ВП). Если бы такие же волны были и вблизи гребней ВП, то основной пик когерентности был бы на четвертьсуточном периоде, поскольку использовалась среднеквадратическая (т.е. всегда положительная) амплитуда КПВВ.

Полусуточные и четвертьсуточные пики на спектрах изменчивости амплитуды 20-минутных волн (см. рис. 6а), а также всплески когерентности этой изменчивости с низкочастотными движениями на полу- и четвертьсуточных периодах (см. рис. 6б) указывает на связь этих волн с внутренними прили-

вами. Отсутствие когерентности между колебаниями изотермы и интенсивностью 20-минутных вдольбереговых течений, а также заметная связь с интенсивностью течений поперек изобат (см. рис. 6б) согласуется с установленной ранее направленностью волн (см. рис. 5). Все эти характеристики указывает на связь КПВВ с внутренними приливами, генерируемыми локально у кромки шельфа, а не с волнами, приходящими издалека и распространяющимися вдоль изобат, хотя именно эти волны доминируют в поле внутренних приливов залива Мамала [11, 17, 20, 21].

Когерентность течений разных направлений с колебаниями термоклина также достигает максимальных значений при направлении поперек изобат (рис. 6в). Следует отметить, что пику когерентности на частоте 3.5 ц/ч при направлении 240° соответствует почти нулевая разность фаз 13° (рис. 6г), как это и должно быть в бегущих к берегу волнах низшей моды, в которых колебания глубины пикноклина и орбитальных течений в нижнем слое синфазны.

С помощью разработанного метода обработки, позволяющего оценивать фазовую скорость узконаправленных волн по данным ADP [20], были рассчитаны параметры 20-минутных волн, направленных поперек изобат. В рассматриваемом методе используется уравнение неразрывности и данные о горизонтальных U , V и вертикальных W скоростях течений в трех горизонтах в слое, где волны хорошо выражены как в горизонтальной скорости, так и в вертикальном градиенте вертикальной скорости dW/dz .

Суть метода заключается в следующем. Если волна бежит вдоль оси Oy , то уравнение неразрывности имеет вид

$$V_y + W_z = 0, \quad (1)$$

где V_y и W_z – частные производные по осям Oy и Oz .

Для синусоидальной волны:

$$V = \sin(Ft - Ky), \quad (2)$$

где F – круговая частота, K – волновое число в меридиональном направлении,

$$V_t = F \cos(Ft - Ky) \quad \text{и} \quad V_y = -K \cos(Ft - Ky), \quad (3)$$

где V_t – частная производная по оси времени.

Поскольку фазовая скорость волны $C = F/K$, имеем

$$V_y = -V_t/C, \quad (4)$$

откуда с учетом уравнения неразрывности получаем

$$C = V_t/W_z. \quad (5)$$

Анализ фазовых скоростей КПВВ проводился для волн, наблюдаемых в слое 58–70 м. При этом выбирались случаи, когда направленные поперек изобат компоненты течений V не менее, чем в 10 раз превышали вдольбереговые скорости U

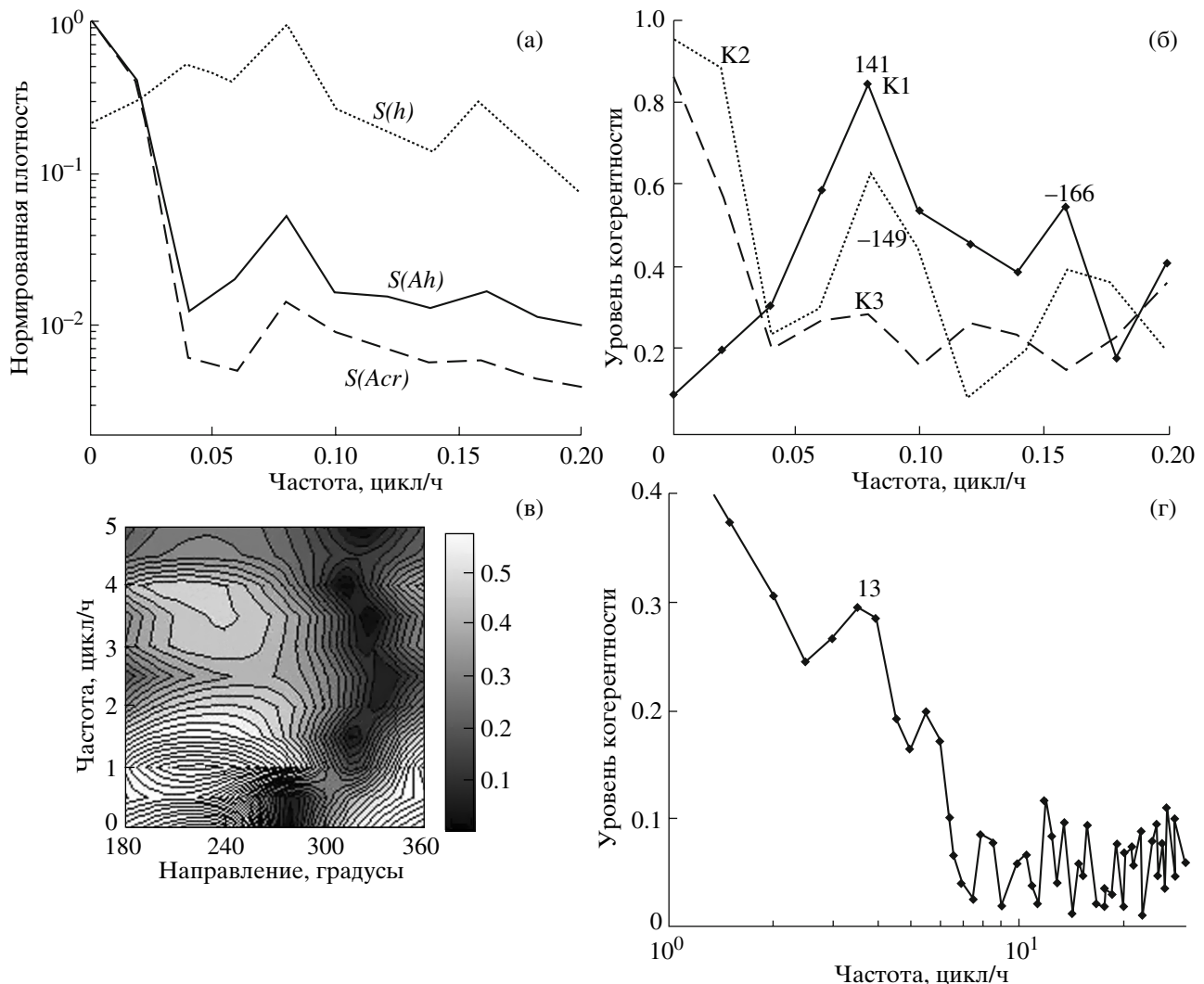


Рис. 6. Связь изменений амплитуды 20-минутных волн с низкочастотными движениями (а, б), а также высокочастотных колебаний термоклина и течений (в, г) на станции В4; а – нормированные спектры колебаний глубины изотермы $S(h)$, амплитуды 20-минутных колебаний изотермы $S(Ah)$ и направленных поперек изобат 20-минутных течений $S(Acr)$; б – графики когерентности K : колебаний глубины изотермы и амплитуды 20-минутных волн ($K1$), бароклинных течений на глубине 70 м вдоль и поперек изобат с изменчивостью амплитуды соответствующих 20-минутных волн ($K2$ – поперечные волны, $K3$ – продольные; числами у пиков когерентности показана разность фаз колебаний; в – когерентность ежеминутных бароклинных течений разных направлений на глубине 70 м с ежеминутными колебаниями глубины изотермы 27° ; г – когерентность ежеминутных бароклинных течений поперек изобат на глубине 70 м с ежеминутными колебаниями глубины изотермы 27° .

(условие узкой направленности), а градиент W_z и значения V были достаточно велики, чтобы не считаться с возможными ошибками измерений. Влияние переноса волн средним течением исключалось вычитанием осредненного по глубине течения, так что скорость волн оценивалась относительно воды.

Результаты расчетов фазовой скорости C_f для станции В4 представлены на рис. 7 в виде одномерной (рис. 7а) и трехмерных (рис. 7б, 7в) гистограмм. На этих рисунках направлению к берегу соответствуют положительные скорости, а от бере-

га – отрицательные. Анализ данных, приведенных на рис. 7, показывает очевидное преобладание случаев, когда волны распространялись к берегу. Причем наибольшей повторяемостью отличались волны с фазовыми скоростями $C_f \sim 0.2$ м/с, в которых вертикальные скорости W были небольшими (меньше 0.1 см/с), а положительная и отрицательная дивергенции встречались одинаково часто. Незначительная дивергенция $|\text{div}V| < 0.0003 \text{ с}^{-1}$, как не выходящая за пределы ошибок оценивания, не учитывалась.

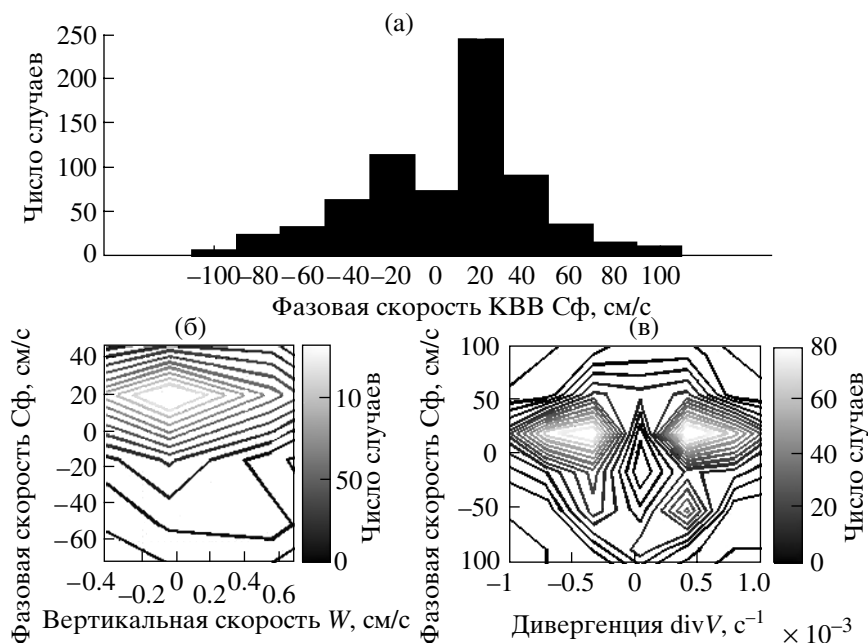


Рис. 7. Гистограммы фазовых скоростей КПВВ по измерениям на станции В4: а – повторяемости случаев фазовой скорости 20-минутных поперечных волн, направленных к берегу ($S_\phi > 0$) и от него ($S_\phi < 0$); б – трехмерная гистограмма вертикальной скорости W и S_ϕ ; в – трехмерная гистограмма горизонтальной дивергенции $\text{div}V$ и S_ϕ .

Несколько реже встречались более быстрые ($S_\phi \sim 0.5$ м/с) и интенсивные (вертикальная скорость $W \sim 0.5$ см/с) внутренние волны, бегущие в океан со скоростью низшей моды (пик в правом нижнем квадранте на рис. 7б и отрог “рельефа” на рис. 7в).

Подобные гистограммы были построены и для станции С4, где длительность периода измерений скоростей была короче, а число полученных оценок фазовых скоростей было меньшим. Как и в точке В4, чаще всего наблюдались слабые и медленные ($S_\phi = 0.2$ м/с) внутренние волны, идущие к берегу. Более быстрые ($S_\phi = 0.5$ м/с) и интенсивные внутренние волны шли в океан.

Быстрые и интенсивные, но реже встречающиеся волновые компоненты поля КПВВ, по-видимому, связаны с эпизодическими солитоноподобными цугами, не очень хорошо выраженными, но все же встречающимися в исследуемом районе.

Рассмотрим теперь вертикальную структуру короткопериодных внутренних волн, используя для этого динамические (расчет по наблюдавшейся в районе частоте плавучести) и эмпирические собственные функции вертикальных скоростей в 20-минутных внутренних волнах (рис. 8).

Профили динамических и эмпирических мод похожи друг на друга, хотя с возрастанием номера моды различия между ними нарастают. Показательно, что амплитуда эмпирических мод довольно слабо уменьшается с номером моды, что снижает качество аппроксимации поля волн с помощью мод.

Можно было бы сделать вывод о значительно большем числе мод, формирующих поле, если бы не следующее важное обстоятельство. Короткопериодные внутренние волны распространяются в пикноклине, глубина которого в исследуемом районе сильно меняется (на 30–50 м) под воздействием мощных внутренних приливов и других низкочастотных процессов (см. рис. 2 и [4, 5]). Узлы и пучности собственных функций при этом следуют за “качающимся” волноводом, что приводит к “размыванию” средней картины и к кажущейся многомодовости колебаний даже в том случае, когда вертикальная структура колебаний проста.

Господствующие в районе приливные течения искажают как профили мод внутренних волн, так и дисперсионные соотношения. Но при рассмотрении средних характеристик внутренних волн влияние переменных течений можно не учитывать, поскольку они лишь “размывают” моды, не приводя к кардинальным изменениям средних дисперсионных характеристик.

Кроме этого, вблизи источника внутренних волн присутствуют не только стоячие по вертикали моды, что и наблюдается в нашем случае. Действительно, спектры вертикальных скоростей, рассчитанные отдельно для волн, энергия которых повышается и снижается (рис. 9), обнаруживают преобладание поднимающихся волн в полосе частот 1–10 ц/ч. Асимметрия особенно заметна на частоте около 3 ц/ч при вертикальной длине волны 50 м. На стан-

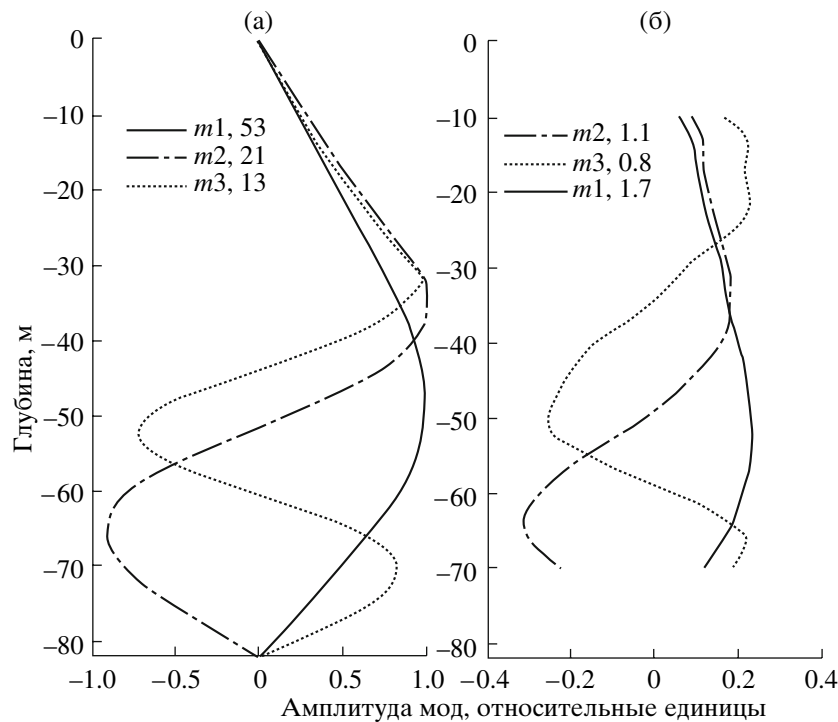


Рис. 8. Нормированные профили амплитуды вертикальных скоростей для 1–3 мод 20-минутных волн: а – динамические моды (рассчитаны по частоте плавучести N); б – эмпирические моды; числами в легендах показаны фазовые скорости (а) и среднеквадратические амплитуды (б) соответствующих мод в см/с.

ции С4 асимметрия несколько слабее, чем на В4. При этом она выражена не только на частоте 3 ц/ч, но и на частоте 5 ц/ч при длине волны 25 м.

Подобная асимметрия указывает на придонную генерацию соответствующих волн, формирующих квазимодовую структуру лишь после отражения в поверхностных слоях.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На основании результатов всестороннего спектрального анализа и использования новых методов обработки данных удалось выявить основные свойства поля короткопериодных внутренних волн в акватории бухты Мамала (о. Оаху, Гавайи), которое отличается большой сложностью без четкого преобладания каких-либо спектральных компонент. Определенная выраженность 15–20-минутных внутренних волн в виде широкого пика на спектре колебаний глубины изотерм не проявляется, в отличие от спектров течений, плавно спадающих с частотой. Такие 15–20-минутные колебания проявляются в таких характеристиках спектров течений, как стабильность и направленность эллипсов орбитальных движений. Для соответствующих частот колебаний отмечается повышение как стабильности, так и направленности эллипсов орбитальных движений. Это позволяет выделять 15–20-минут-

ные внутренние волны из общего фона колебаний со сплошным спектром. Такие характеристики этих волн, как направленность поперек изобат, большая фазовая скорость для наиболее энергичных компонент и явная связь интенсивности волн с внутренними приливами соответствует общепринятому представлению о локальной генерации КПВВ при распаде внутренних приливов на цуги солитонов у края шельфа [23]. В то же время своеобразный характер медленных компонент (сложная модальная структура и асимметрия вертикального спектра) указывает на не вполне обычный механизм их генерации. В исследуемом районе интенсивные волны (возможно, солитоноподобные цуги) шли преимущественно в океан, тогда как более слабые и более медленные компоненты 20-минутных волн распространялись в основном к берегу.

Механизм возбуждения этих невысоких, но часто появляющихся волн не вполне ясен. Можно предположить, что они тоже генерируются приливными течениями (и баротропными, и бароклинными), которые приобретают у очень крутого края шельфа значительные вертикальные составляющие скорости. Действительно, обтекающие крутое дно струи приливных течений “ударяют” пикноклин под большим углом, что должно приводить к его колебаниям на резонансной частоте. Резонансной частотой в данном случае является частота на-

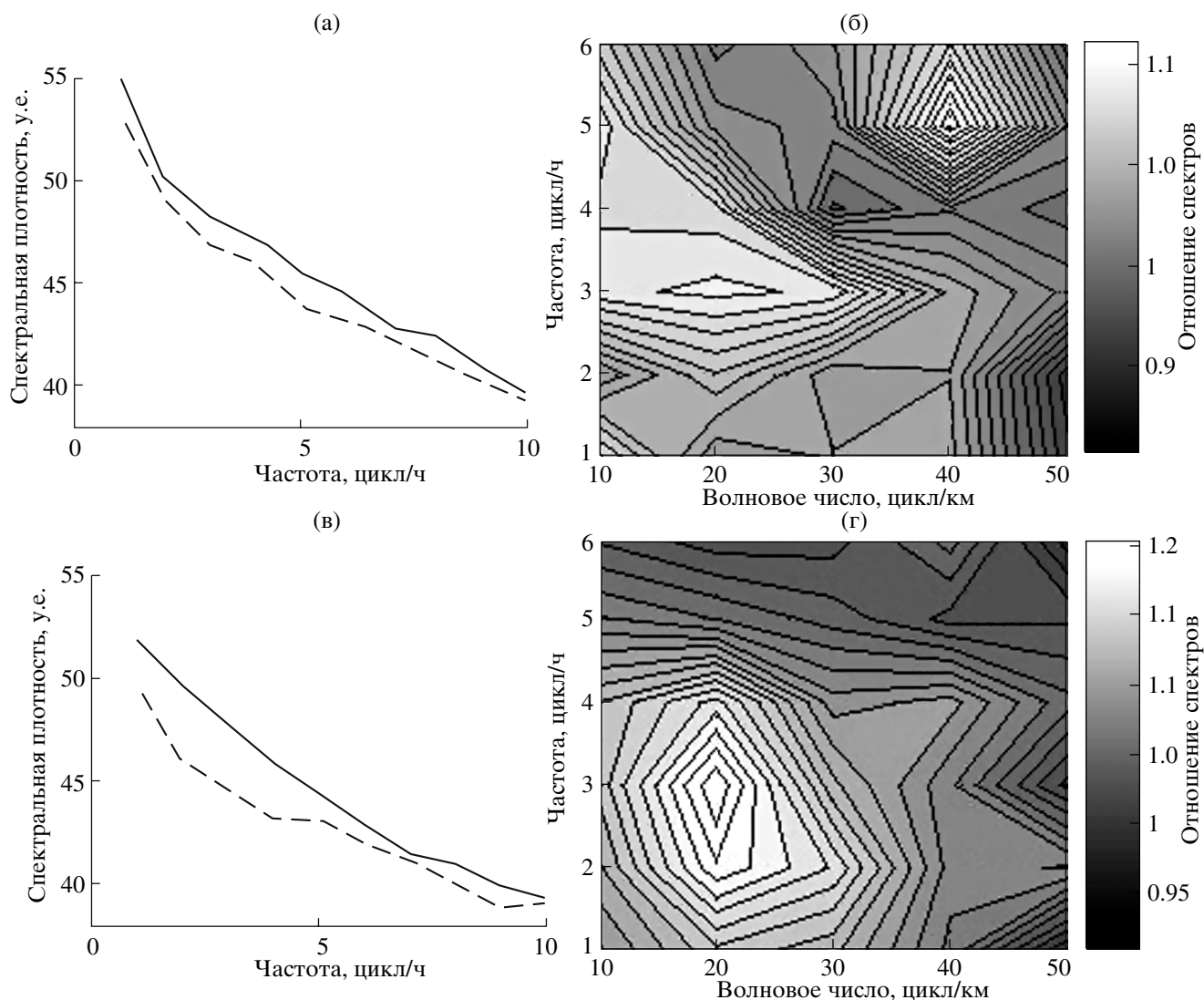


Рис. 9. Асимметрия потоков энергии короткопериодных внутренних волн на станциях С4 (а, б) и В4 (в, г): а, в – частотные спектры вертикальной скорости в волнах, идущих (по энергии) вверх (линия) и вниз (пунктир); б, г – отношение спектров волн, идущих вверх и вниз.

клонных волн F_c , определяемая наклоном дна (т.е. и наклоном обтекающих дно струй приливных течений) и частотой плавучести N у края шельфа:

$$F_c = N \sin A, \quad (6)$$

где A – угол наклона дна, близкий к 30° . Принимая $N = 9$ ц/ч (среднее по вертикали значение у края шельфа), получаем:

$$F_c = 9 \sin 30^\circ = 4.5 \text{ ц/ч}, \quad (7)$$

что близко к частоте доминирующих в районе короткопериодных внутренних волн.

Предлагаемая гипотеза происхождения 15–20-минутных колебаний в исследуемом районе объясняет и другие их особенности, а именно, асимметрию вертикального спектра и явное при-

сутствие высших мод, проявляющееся в их малых скоростях и сложной вертикальной структуре. Другими словами, генерируемые наклонными струями приливных течений колебания должны тоже иметь наклонную составляющую, которая описывается многими модами.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По результатам проведенных исследований характеристик короткопериодных внутренних волн в акватории бухты Мамала (о. Оаху, Гавайи) можно сделать следующие выводы. В сложном поле таких внутренних волн выделяются относительно узконаправленные 15–20-минутные колебания двух видов: 1) часто встречающиеся слабые и медленные вол-

ны, идущие к берегу; 2) более быстрые и интенсивные волны, бегущие в океан.

Медленные, слабые и очень короткие (длиной 100–200 м) волны, по-видимому, возбуждаются в результате специфического взаимодействия пикноклина и сильных приливных течений над крутым склоном. Они распространяются к берегу со скоростью волн 2–4-й мод при некотором преобладании энергии, идущей вверх. Более быстрые и сильные волны, уходящие в океан со скоростью низшей моды, скорее всего связаны с распадом локально генерируемых внутренних приливов, обычно происходящим у края шельфов. Относительно слабое проявление возникающих при этом цугов солитоноподобных волн объясняется близостью берега и неблагоприятной для их генерации плотностной стратификацией вод залива Мамала. Испытывающий сильные колебания пикноклин в заливе располагается в середине слоя воды, вследствие чего солитоны возбуждаются лишь при высоком или низком его положении.

Суперпозиция коротких волн разного происхождения (в том числе и волн открытого океана [10, 16], распространяющихся к шельфу) вместе с эпизодически появляющимися слабовыраженными солитонами придает особый характер полю короткопериодных внутренних волн на шельфе о. Оаху, возможно, свойственный и другим островным шельфам с крутыми склонами.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондур В.Г. Аэрокосмические методы в современной океанологии // Новые идеи в океанологии. Т. 1. М.: Наука, 2004. 352 с.
2. Бондур В.Г., Замшина А.Ш. Исследование высокочастотных внутренних волн на границе шельфа по спектрам космических оптических изображений // Изв. вузов. Сек. Геодезия и аэрофотосъемка. 2008. № 1. С. 85–96.
3. Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Морозов Е.Г. Регистрация из космоса и моделирование коротких внутренних волн в прибрежных зонах океана // ДАН. 2008. Т. 48. № 4. С. 543–548.
4. Бондур В.Г., Сабинин К.Д., Гребенюк Ю.В. Изменчивость внутренних приливов на шельфе о. Оаху (Гавайи) / Океанология. 2008. Т. 48. № 5. С. 661–671.
5. Бондур В.Г., Гребенюк Ю.В., Сабинин К.Д. Особенности генерации внутренних приливов у о. Оаху (Гавайи) / Океанология. 2009. Т. 49. № 2. С. 1–11.
6. Бондур В.Г., Филатов Н.Н., Гребенюк Ю.В. и др. Исследование гидрофизических процессов при мониторинге антропогенных воздействий на прибрежные акватории (на примере бухты Мамала, о. Оаху, Гавайи) // Океанология. 2007. Т. 47. № 6. С. 827–846.
7. Коняев К.В. Полусуточные наклонные внутренние волны в пикноклине по данным о вертикальных профилях течения в Арктике // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2002. Т. 38. № 6. С. 848–85.
8. Коняев К.В., Сабинин К.Д. Волны внутри океана. СПб.: Гидрометеиздат, 1992. 272 с.
9. Рожков В.А. Методы вероятностного анализа океанологических процессов. Л.: Гидрометеиздат, 1979. 280 с.
10. Сабинин К.Д., Шулепов В.А. К модели частотного спектра внутренних волн в океане // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1981. Т. 17. № 1. С. 67–75.
11. Alford M.H., Gregg M.C., Merrifield M.A. Structure, Propagation and Mixing of Energetic Baroclinic Tides in Mamala Bay // J. Phys. Oceanogr. 2006. V. 36. P. 997–1018.
12. Apel J.R., Ostrovsky L.A., Stepanyants Y.A. Internal solitons in the ocean. Report GOA, 1998. № 98–3.
13. Bondur V.G. Complex Satellite Monitoring of Coastal Water Areas // Proc. of 31st Int. Symp. on Remote Sensing of Environment, St. Petersburg, 2005. Plenary presentation. P. 1–6.
14. Bondur V.G., Filatov N. N. Study of physical processes in coastal zone for detecting anthropogenic impact by means of remote sensing // Proc. of the 7th Workshop on Physical processes in natural waters, Petrozavodsk, Russia, 2003. P. 98–103.
15. Fofonoff N.P. Spectral characteristics of internal waves in the ocean // Deep-Sea Res. 1969. V. 16. P. 58–71.
16. Garrett C., Munk W. Space-time scales of internal waves: A progress report // J. Geophys. Res., 1975. V. 80. P. 291–297.
17. Holloway P.E., Merrifield M.A. On the spring-neap variability and age of the internal tide at the Hawaiian Ridge // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. № C4. P. 3126.
18. Jackson C.R., Apel J.R. An atlas of internal solitary-like waves and their properties // Global Ocean Associates. 2002.
19. Keeler R., Bondur V., Gibson C. Optical satellite imagery detection of internal wave effects from a submerged turbulent outfall in the stratified ocean // Geophys. Res. Letters. 2005. V. 32. L12610, doi: 10.1029/2005GL022390/
20. Merrifield M.A., Alford M.H. Structure and variability of semi-diurnal internal tides in Mamala Bay, Hawaii // J. Geophys. Res. 2004. V. 109. C05010. doi: 10.1029/2003JC002049.
21. Merrifield M.A., Holloway P.E. Model estimates of M2 internal tide energetics at the Hawaiian Ridge // J. Geophys. Res. 2002. V. 107. № C8. 3179, doi: 10.1029/2001JC000996.
22. Sabinin K. Divergence and filamentation of the sea currents at the shelf edge // Abstracts. Int. Conf. "Fluxes and Structures in Fluids". St.-Petersburg, 2007. P. 100–101.
23. Sabinin K.D., Serebryany A.N. Intense short-period internal waves in the ocean // J. Marine Res. 2005. V. 63. P. 227–261.

The Spectral Characteristics and Kinematics of Short-Period Internal Waves on the Hawaiian Shelf

V. G. Bondur^a, Yu. V. Grebenyuk^a, and K. D. Sabinin^b

^a Aerokosmos Scientific Center of Aerospace Monitoring, Gorokhovskii per. 4, Moscow, 105064 Russia
e-mail: vgbondur@online.ru

^b Institute for Space Research, Russian Academy of Sciences, ul. Profsoyuznaya 84/32, Moscow, 117810 Russia
e-mail: ksabinin@yandex.ru

Received November 11, 2008; in final form, March 16, 2009

Abstract—Based on the results of analyzing the characteristics of currents and temperature measured in the water space of the Mamala Bay (the Island of Oahu, Hawaii), we investigate the main properties of the field of short-period internal waves, which is very complex. We focus on analyzing the spectral characteristics and orbit parameters for waves with a period of 20 minutes. The results of investigations reveal two types of short-period internal waves for this area: intense and fast waves propagating predominantly toward the ocean and weaker and slower waves propagating mainly toward the coast. Suppositions are made on how these waves form: the strong and fast waves are likely to be caused by the decay of locally generated internal tides near the shelf edge, while the weak and slow and very short waves seem to result from the specific interaction between the pycnocline and strong tidal currents over a steep slope.